

Laßt hundert Blumen blühen

Wolfgang Bibel¹

Abstract: Der Beitrag skizziert im ersten Teil einschlägige Aspekte der historischen Entwicklung der Künstlichen Intelligenz (KI) als Wissenschaft und daraus resultierender Technologie. Im zweiten Teil werden beispielhaft Synergien zwischen Verfahren des „deep learning“ (DL) und dem klassischen automatischen Beweisen erläutert. Aus diesen beiden Analysen werden im dritten Teil Empfehlungen für die weitere Entwicklung von Wissenschaft und Technologie der KI in Deutschland und Europa abgeleitet; spezifische Fragestellungen vor allem im Zusammenhang mit DL finden dabei eine besondere Berücksichtigung.

Keywords: Künstliche Intelligenz; Wissenschaftsgeschichte; Maschinelles Lernen; Deep Learning; Automatisches Beweisen

1 Einleitung

Der Workshop „Konzeptionelle Herausforderungen für die KI“ auf der Jahrestagung der Gesellschaft für Informatik, INFORMATIK2020, spricht in seinem Begleittext von einer „neue[n], auf statistischer Analyse großer Datenmengen aufbauende[n] KI“. Der vorliegende Beitrag zu diesem Workshop diskutiert zunächst die Frage, inwieweit man hierbei überhaupt von einer „neuen KI“ sprechen sollte. Dazu wird diesbezüglich auf die Entwicklung des Gebiets der Künstlichen Intelligenz (KI) eingegangen. Dieser Teil versteht sich insgesamt als ein Appell an alle in der KI und um sie herum, die zugrundeliegende Wissenschaft und die sich aus ihr nährenden Technologie als ein großes Ganzes zu verstehen, jedes Teilgebiet darin erblühen und die so erwachsende Gesamtheit hin zu künstlicher allgemeiner Intelligenz synergetisch zu großer Stärke gedeihen zu lassen.

Im zweiten Teil wird dann an einem konkreten Forschungsthema illustriert, wie sich zwei Teilgebiete der KI gegenseitig befruchten und verstärken können. Es handelt sich zum einen um das heute so erfolgreiche Gebiet des maschinellen Lernens (ML), beispielsweise in der Ausprägung von „deep learning“ (DL), und zum anderen um das vor mehr als siebenzig Jahren in Deutschland begründete Gebiet des automatischen Beweizens (ATP). Nur mit grundlegenden Beiträgen – mindestens auch – von diesen beiden lassen sich die wünschenswerten Ziele erreichen, die sich mit einer KI der Zukunft verknüpfen.

Im letzten Teil werden aus der vorangegangenen Analyse die Konsequenzen für eine künftige Entwicklung der KI gezogen. Es gilt, sich auch der Schwächen des DL anzunehmen, die

¹ Technische Universität Darmstadt, bibel@gmx.net

übrigen Gebiete der KI gleichberechtigt im Fokus zu behalten und synergetisch zusammenzuführen. Als Lehre aus einer hierzulande nur bedingt erfolgreichen KI-Geschichte wird für Europa und Deutschland die Orientierung der Förderung von KI an einer wohlüberlegten Vision von Anwendungen auch auf Bereiche empfohlen, deren Handlungs- und Entscheidungsprozesse aus KI-Sicht bis heute in völlig inadäquater Weise angelegt sind. Eine solche Rationalisierung gesellschaftlichen Handelns würde tunlichst einhergehen mit entsprechenden institutionellen Neustrukturierungen, nicht zuletzt auch einer Neuordnung des Gefüges der Wissenschaften unter Berücksichtigung der seit Mitte des letzten Jahrhunderts erzielten Erkenntnisse.

Der Titel soll die vom Autor vertretene Strategie hin zu einer fruchtbaren wissenschaftlichen Entwicklung bildlich zum Ausdruck bringen. Dabei sei nicht verschwiegen, daß er einem Zitat von Mao Zedong aus dem Jahre 1956 entlehnt ist, das in seiner Gänze lautet: „Laßt hundert Blumen blühen, laßt hundert Schulen miteinander wetteifern“. Dieser historische Hinweis mag auch zur Erinnerung daran dienen, daß es mit einem schönen Appell allein nicht getan ist, sondern daß das anschließende Tun sich immer an den Worten orientieren und messen lassen muß, um Fehlentwicklungen schon im Keim ersticken zu können.

2 Anmerkungen zur Historie der KI

Das Gadamer- bzw. Heidegger-Zitat „Zukunft ist Herkunft“ komprimiert in drei Worten die historische Erfahrung der großen Bedeutung der Geschichte für die kluge Wahl eines Weges in die Zukunft. Um dem Anliegen dieses Workshops nach richtungsweisenden Konzepten für die KI Genüge tun zu können, beginnt dieser Beitrag daher mit einschlägigen Erinnerungen an die Historie der KI. Aufgrund dieser Historie wird sich auch erweisen, inwieweit es gerechtfertigt ist, von einer „neuen KI“ im Zusammenhang mit den derzeit so aktuellen Lernverfahren zu sprechen.

Eine international umfassende Darstellung der Geschichte der KI gibt es bis heute leider nicht. Das Nilssonsche Buch [Ni09] fokussiert fast ausschließlich auf die Entwicklung in den USA und erweist sich damit in entscheidenden Aspekten als unvollständig. So wird darin im Kapitel 3 auf die einschlägigen Inhalte von drei Konferenzen in den USA und einer in UK eingegangen, die in den Jahren 1948, 1955, 1956 und 1958 stattgefunden haben und als Beginn der KI eingeschätzt werden. Die Arbeiten von Konrad Zuse aus den Jahren 1945 bis 1950, repräsentiert durch die Veröffentlichungen [Zu48, Zu49, Zu50a, Zu50b], die die KI schon Jahre davor inhaltlich begründet haben, sind damit dort unerwähnt geblieben. Unverständlicherweise haben es auch die deutschen Begründer der Informatik bis heute versäumt, diesen historisch herausragenden Beitrag Zuses angemessen zu würdigen. So ist dieser bis heute so gut wie unbekannt geblieben. Ich möchte daher auch an dieser Stelle auf die mir in diesem Zusammenhang bislang bekannten folgenden Sachverhalte hinweisen (s. dazu auch [Bi20a]).

Aufgrund der besonderen Umstände der Nachkriegszeit fokussierte Zuse ab 1945 seine Arbeit auf eine umfassendere Darstellung seiner grundlegenden Erkenntnisse zum „allgemeinen Rechnen“. Hierzu sind im „Konrad Zuse Internet Archive“ umfangreiche handschriftliche Manuskripte wie beispielsweise seine „Theorie der angewandten Logistik“ verfügbar. Als unveröffentlichte Manuskripte begründen sie nur bedingt einen Anspruch auf urheberrechtliche Anerkennung. Völlig anders steht es jedoch mit den aus den Inhalten dieser Texte hervorgegangenen Publikationen, von denen es aus den Jahren 1948 bis 1950 mindestens zwei in Zeitschriften [Zu48, Zu49] sowie zwei Patentschriften [Zu50a, Zu50b] gibt. Diese vier Publikationen dokumentieren eindeutig die Zuseschen Forschungsergebnisse bis zum Jahre 1950, die sich wie folgt kurz zusammenfassen lassen.²

Danach war Zuse die Universalität seiner Rechner bereits voll bewußt. Er beschreibt beispielsweise detailliert, wie ein Rechner die Wohlgeformtheit einer logischen Formel nachweisen kann, dh. er gibt den Algorithmus (bei ihm „Vorschrift“ genannt) dafür an. Als formale Sprache zur Beschreibung des Algorithmus legt er seinen Plankalkül zugrunde, der die weltweit erste Programmiersprache darstellt. Insgesamt präsentiert er damit das weltweit erste nichtnumerische Programm. Der Plankalkül selbst erscheint nach einer groben Einsicht als eine logische Programmiersprache, vom grundlegenden Konzept her vergleichbar mit dem mehr als 25 Jahre später entstandenen PROLOG. Um die Implementierbarkeit des Plankalküls nachzuweisen, gibt Zuse zudem Algorithmen an, die den automatischen Beweis von Formeln in der Prädikatenlogik erbringen. Damit begründet er zugleich das Gebiet des Automatischen Beweisens (automated theorem proving, ATP) und zwar Jahre vor Newell, Shaw und Simon [NSS56] bzw. Davis [Da57], die bislang international als dessen erste Pioniere gelten. Da dieses eines der Kerngebiete der KI darstellt, begründet er inhaltlich damit implizit zugleich die KI [Bi20b]. Eine eingehende und sachkundige Analyse dieser herausragenden Beiträge steht bislang noch immer aus.

Vor dem Hintergrund dieser wissenschaftlich belegten Beiträge dürfen dann natürlich auch seine unveröffentlichten Manuskripte ergänzende Berücksichtigung in der Beurteilung Zuses historischer Beiträge finden. Beispielsweise ist seine Formalisierung des Schachspiels im Plankalkül bereits ab 1945 hier zu erwähnen, die seine breite KI-Sicht bestätigt. Insgesamt rundet sich damit das Bild von Zuse nicht nur als Erfinder des modernen Computers sondern inhaltlich zugleich als Mitbegründer einer Wissenschaft ab, die hinter der KI steht (vgl. [Bi18]), und zwar von vergleichbarem Rang wie Alan Turing. Daß Zuses Beiträge weder auf die weitere Entwicklung des Computers noch auf die der KI nachweisbaren Einfluß nehmen konnten, steht auf einem anderen Blatt und bedürfte einer zusätzlichen historischen Analyse.

In etwa zeitgleich mit Zuses beschriebenen Arbeiten ist Wieners Kybernetik-Buch [Wi48] entstanden, der in diesem Kontext nicht ungenannt bleiben sollte. Zudem gab es erste Überlegungen zur maschinellen Sprachübersetzung, beispielsweise durch Andrew Booth und Warren Weaver (s. [Bi14]). Etwas später publizierte auch Claude Shannon die Be-

² Die Hinweise auf diese Schriften Zuses verdanke ich Herrn Dr. Ralf Bülow, der auf deren Inhalte beispielsweise in [Bü20] aufmerksam gemacht hat.

schreibung von Algorithmen zum Schach [Sh50] in einer Weise, die über die analogen Beschreibungen von Zuse Jahre vorher nicht hinausgeht, sondern hinter diesen teilweise sogar zurückbleibt.³ Damit entfällt die in [Bi14, Footnote 12] angebrachte Rechtfertigung für die Nichterwähnung von Zuse in diesem Kontext, dh. Zuse war auch der weltweit erste Begründer der Schachprogrammierung. Vor allem ist dann auch Alan Turing zu nennen, der mit seinem Mind-Artikel [Tu50] eine Leit-Perspektive für die KI schuf. Ihm war Zuse in Bezug auf das akademische Knowhow, vor allem in Bezug auf Publikationen unterlegen, während in ihren Visionen beide durchaus vergleichbar sind.

Nach diesen – bei weitem nicht vollständig aufgezählten – individuellen und inhaltlichen Ansätzen zur KI fanden dann die eingangs erwähnten Konferenzen, vor allem die Dartmouth Konferenz [Mc55] im Jahre 1956 statt, die als formeller Start der institutionalisierten KI angesehen wird. Sie hat als Kristallisationspunkt dazu geführt, daß sich die KI dann vor allem in den USA rasch entwickeln konnte. Eine Darstellung der geschichtlichen Entwicklung der KI ist offensichtlich aber sehr unvollständig, wenn sie erst mit diesen Konferenzen beginnt und die hier aufgelisteten Forscher neben weiteren unerwähnt läßt. In diesem Sinne ist die eingangs erwähnte Feststellung zu verstehen, daß eine solche umfassende Darstellung bis heute aussteht. Wie wir an einzelnen Punkten im Folgenden sehen werden, sind auch die Jahre danach historisch bislang nur lückenhaft aufgearbeitet.

Als Begründer des Gebietes von lernfähigen Neuronalen Netzen (NNs) und damit auch des Teilgebietes des maschinellen Lernens (ML) in der KI gilt Frank Rosenblatt mit seinem Perzeptron-Modell [Ro58]. In [Bi14] wurde jedoch darauf hingewiesen und detaillierter ausgeführt, daß Karl Steinbuch schon vorher die wesentlichen Ideen zu seiner Lernmatrix als Patent angemeldet hatte (s. auch [KIT06], wo es bestätigend heißt: „Während seiner Industrietätigkeit meldete Steinbuch mehrere Dutzend Patente an, darunter das für die „Lernmatrix“.“ – Steinbuchs reine Industrietätigkeit endete 1958 mit der Berufung als Professor). Wenn diese Aussagen in einer detaillierten Überprüfung bestätigt würden, dann gebührte der Lernmatrix damit nicht nur die zeitliche Priorität in Bezug auf NNs, sondern sie ist zusätzlich dem Perzeptron in Bezug auf Lernfähigkeiten weit überlegen.

Nach meinem auf Originalliteratur wie [St60] beruhenden eigenen Kenntnisstand hatte Steinbuch seine Lernmatrix spätestens 1960 entwickelt und als Patent publiziert, in dem Rosenblatt nicht zitiert ist.⁴ Im Gegensatz zu Rosenblatts einfachen NNs mit zwei Eingabe- und einem Ausgabeneuron weist die Steinbuchsche Matrix $m \times n$ Schaltelemente bzw. Neuronen auf und ist daher wesentlich allgemeiner in dem Sinne, daß es wesentlich mehr Funktionen lernen kann.

Wie im Falle von Zuse wurde auch Steinbuch international so gut wie nicht zur Kenntnis genommen, obwohl er seine Ergebnisse 1963 zusätzlich in einem angesehenen Journal der IEEE veröffentlichte. In einschlägigen Publikationen sucht man seinen Namen in diesem

³ So schreibt Cannon noch 1948: „Our problem is to represent chess as numbers and operations on numbers“, während Zuse schon Jahre vorher zum allgemeinen Rechnen mit nichtnumerischen Objekten gelangt war.

⁴ Den Hinweis auf die zitierte Patentschrift verdanke ich Christian Vater.

Kontext aber auch heute noch vergeblich. Aufgrund des Vorangehenden gebührt ihm in Bezug auf die Erfindung der NNs jedoch mindestens der gleiche Rang wie Rosenblatt, wenn nicht sogar ein höherer.

Die NNs haben seither eine wechselvolle Geschichte zu verzeichnen, die von den Fortschritten der Forschung auf diesem Gebiet vor allem in Nordamerika geprägt war. Sie ist, beginnend mit 1943, zB. in [AD20] beschrieben. Etwa um 2012 erreichte die Entwicklung der NNs beispielsweise mit der Publikation [KSH12], fußend auf ihrem Vorläufer [Le98], einen Höhepunkt, der auf der Grundlage der bis dahin insgesamt erreichten Ergebnisse seitdem zu unzähligen und tief beeindruckenden Anwendungen führte, die auch in der Öffentlichkeit großes Aufsehen erregen. Zu diesen gehören die Erkennung von Bildern, Gesichtern, Videos, Verstehen akustischer Sprache, Übersetzung von natürlicher Sprache, Generierung von Texten, Einsatz zur Steuerung autonomer Fahrzeuge, Automatisierung von Finanzinvestitionen uvam. Diese revolutionäre Leistungsverbesserung der NNs ist nun als „deep learning“ (DL) bekannt geworden. Der Erfolg von DL ist der Kombination von drei entscheidenden Faktoren zu verdanken: die zwischenzeitliche Verfügbarkeit wesentlich größerer Datenmengen, die zugrundeliegenden algorithmischen Innovationen, mittels derer diese komplexen NNs auf der Grundlage von großen Datenmengen trainiert werden können, und die Implementierung dieser Algorithmen auf graphischen Prozessoren (GPU), die die erforderliche Rechenleistung erbringen.

Dieser kurze Abriss der historischen Entwicklung der NNs macht deutlich, daß es sich bei DL um eine ganz normale Fortentwicklung eines wissenschaftlichen Teilgebiets innerhalb des ML handelt, wenn auch einem technologisch aktuell extrem erfolgreichen. Und ML bleibt auch weiterhin nur eines der vielen Teilgebiete innerhalb der KI. DL als „neue KI“ zu bezeichnen ist daher sachlich völlig unbegründet.

Diese und andere Fehleinschätzungen im Zusammenhang mit KI haben auch damit zu tun, daß generell der Status der KI innerhalb der Wissenschaften bis heute unsachgemäßen Vorstellungen unterliegt. Die Pioniere der KI, von denen oben die Rede war, haben in ihren Publikationen klar zu erkennen gegeben, daß die Erfindung des Computers zugleich den Start für die Entwicklung einer neuen Naturwissenschaft vom Range der Physik und der Biologie ausgelöst hat.

Diese beiden letztgenannten Disziplinen samt den jeweiligen Clustern von Disziplinen um sie herum waren extrem erfolgreich darin, Erklärungen für die Phänomene der Welt in naturwissenschaftlich präziser Weise mittels experimentell begründeten Theorien zu erarbeiten. Ihrem Zugriff entzogen sich jedoch bis zur Mitte des letzten Jahrhunderts ein großes Bündel von unsichtbaren und ungreifbaren Phänomenen, für die bis dahin daher nur spekulative Erklärungen aufgestellt werden konnten. Dazu gehören der Austausch und die Auswertung von Signalen und Informationen, Wahrnehmungen, Kommunikation, mentale Einstellungen, Intensionen, Zielvorgaben, Empfindungen, Emotionen, Aktionssteuerung, Bewußtsein, Denken, Psyche, Geist, Intellekt usw. Zwar ließen sich derartige Phänomene in ihren Auswirkungen teilweise beobachten und die Beobachtungen konnten beschrieben wer-

den. Zu brauchbaren Erklärungen konnte das verfügbare wissenschaftliche Instrumentarium jedoch nicht ausreichen. Genau das hat sich mit der Erfindung des universellen Computers grundlegend geändert und die Entwicklung einer neuen Naturwissenschaft ausgelöst, die in den ersten Jahrzehnten vor allem von den KI-Pionieren und Informatikern vorangetrieben wurde. Diese Entwicklung hat zugleich zu einer technologischen Entwicklung von bis dahin ungekanntem Ausmaß geführt, die noch immer mit einem stetig zunehmenden Tempo andauert.

Die hiermit beschriebene neue Naturwissenschaft wird bis heute nicht als einheitliche Wissenschaft verstanden; vielmehr wird sie innerhalb unterschiedlichster Disziplinen in verzettelter Weise betrieben. Zu diesen gehören KI, Informatik, Neurowissenschaften, Kognitionswissenschaft, (Kognitions-) Psychologie, Philosophie, Verhaltensforschung uvm. Sie alle fokussieren in ihren einschlägigen Zielrichtungen auf das oben beschriebene Bündel natürlicher Phänomene, leider oft ohne Kenntnisnahme der entsprechenden oder einschlägigen Erkenntnisse zu den analogen Phänomenen in anderen dieser Disziplinen. Das folgende Beispiel möge diese bedauerliche Zersplitterung illustrieren.

In [HFB20] wird über biologische Experimente berichtet, die in der Beobachtung des Verhaltens von Ameisen (*temnothorax albipennis* ants) bestanden. Aufgrund dieser Beobachtungen wurde das Verhalten in einem einfachen algorithmischen Modell simuliert. Wie man den Referenzen der Veröffentlichung entnehmen kann, haben die Autoren offenbar nicht die geringste Kenntnis von der Tatsache, daß Ameisenalgorithmen seit Jahrzehnten in der KI intensivst studiert werden [DS04], mittels derer die Simulation des Ameisenverhaltens schon weit fortgeschritten ist. Vielmehr beginnen sie mit ihren Studien wieder bei Null, wenn auch unter Verwendung informatischer Systeme, anstatt an den in der KI inzwischen diesbezüglich erreichten Stand anzuknüpfen und ihn weiter voranzutreiben. Das ist reine und bedauerliche Verschwendung von Forschungskraft und Forschungsgeld. Das Beispiel ist dabei leider nur eines unter Tausenden analoger Forschungen.

Die Ursache für diese exorbitante Verschleuderung von Forschungspotenzial liegt eindeutig in der beschriebenen Zersplitterung einer Wissenschaft, die durch den gemeinsamen Forschungsgegenstand und die mit dem Computer nun verfügbare Methodik charakterisiert ist, wie beispielsweise in [Bi18] genauer beschrieben wurde. Dort wird auch erläutert, daß sich infolge dieser Zersplitterung bis heute auch keine Bezeichnung dieser Wissenschaft eingebürgert hat. Um sie benennen zu können, wird dort die Kunstbezeichnung IPsi-Wissenschaft (kurz für *I*nformation, *P*sychologie, *I*ntelligenz) verwendet, die anstelle von KI auch hier gelegentlich als Notbehelf dienen mag, wenn die Betonung auf KI vor allem als allgemeiner Wissenschaft – und nicht nur als daraus hervorgegangener Technologie – liegt.

Die Methode von IPsi besteht in der Modellierung auf dem universellen Computer, beispielsweise zur Simulierung des Verhaltens von Ameisen. Die Modellierung erlaubt dann Experimente, mathematische Theoriebildung und deren experimentelle Bestätigung. Dies ist das grundlegende und charakteristische Vorgehen einer jeden Naturwissenschaft und Kern des bereits Jahrhunderte anhaltenden Erfolgs der Naturwissenschaften. IPsi

spielt in den aufgezählten und vielen weiteren Disziplinen zunehmend eine zentrale Rolle. Vormals geisteswissenschaftlich oder vorwissenschaftlich betriebene Forschung wird dabei nunmehr mit präzisen Methoden naturwissenschaftlich durchgeführt und erzielt so fundierte und jederzeit nachprüfbarere Erkenntnisse analog wie in Physik, Biologie etc. anstelle der vormals rein spekulativen Vorstellungen und deren Tradierungen. Dies ist die eigentliche wissenschaftliche Revolution, die mit der Erfindung des Computers ausgelöst wurde.

Es gibt unterschiedliche Ansätze, um zu einer Modellierung eines natürlichen Phänomens zu gelangen. Sie mag auf der Grundlage von Beobachtungen von Hand programmiert und die dabei entstehenden Programme dann schrittweise verbessert werden. Mittels Lernverfahren wie DL kann dieser iterative Prozeß erheblich beschleunigt und automatisiert werden. Anstelle derartiger phänomenologisch geprägter Ansätze kann man auch versuchen, die Maschinerie der Natur unmittelbar künstlich zu simulieren und so beispielsweise die neuronale Struktur der Ameisen auf den Rechner abzubilden. Um welches natürliche Phänomen es sich bei einer solchen Simulation handelt, spielt für das methodische Vorgehen eine zweitrangige Bedeutung. Die gleiche – hier für das Verhalten von Ameisen illustrierte – Methode hat sich bei jedem der natürlichen Phänomene aus dem oben beschriebenen Bündel erfolgreich bewährt und es so jeweils erstmalig einer naturwissenschaftlichen Untersuchung zugänglich gemacht.

3 Integrationsschritte am Beispiel von ATP und ML

Eines der natürlichen Phänomene aus dem im letzten Abschnitt beschriebenen Bündel ist das mathematische Beweisen auf der Grundlage präziser logischer Schlüsse. Diese Fähigkeit des menschlichen Geistes hat seit Jahrtausenden die Grundlagen für ein wissenschaftlich fundiertes Zurechtfinden in der Welt gelegt. Zudem gilt das mathematische Denken als Modell und Vorbild für logisches Denken allgemein. Es war daher auch kein Zufall, daß Zuse genau dieses Phänomen für die Demonstration der Potenz der neuen Rechner in den frühen Pionierarbeiten [Zu48, Zu49] ausgewählt hat. Seither hat das automatische Beweisen (ATP) innerhalb der KI eine beeindruckende Entwicklung erleben dürfen und in einer Reihe von Fällen bereits die entsprechenden menschlichen Fähigkeiten übertreffen können.

In den ersten Jahrzehnten vollzog sich diese Entwicklung ausschließlich längs des ersten der beiden im letzten Abschnitt beschriebenen Ansätze, nämlich der Programmierung von Hand unter Zugrundelegung von Logikkalkülen, die die Logiker aus der Beobachtung des menschlichen Schließens im Verlauf von mehr als zwei Jahrtausenden entwickelt haben. Bereits Ende der 1980er Jahre haben Mitglieder aus der Forschungsgruppe des Autors international wohl erstmals Versuche in Richtung eines Einsatzes von NNs mittels darauf basierender Lernverfahren zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit automatischer Beweiser unternommen [ESS89]. Der damit begründete Forschungszweig einer synergetischen Integration von ATP und ML hat in den drei Jahrzehnten seither eine wiederum erfolgreiche Entwicklung hin zu immer besseren Systemen erfahren, die sich in Arbeiten

wie beispielsweise [PU20] widerspiegelt, um eine der neuesten Arbeiten dazu aus der inzwischen vorhandenen Fülle herauszugreifen.

In dieser Arbeit wird auf der Grundlage von 13.822 verfügbaren Beweisen mathematischer Theoreme ein rekurrentes neuronales Netz (RNN) daraufhin trainiert, die bestmögliche Wahl unter vorhandenen Alternativen bei jedem Beweisschritt zu treffen. Nach dem Training, sprich der Lernphase, zeigt das System eine signifikant bessere Performanz bei der Beweissuche auch für Theoreme, die nicht in der Trainingsmenge enthalten waren.

Experimente und Veröffentlichungen dieser Art gibt es inzwischen unzählige, von denen einige sich beispielsweise in den Referenzen von [BO19, FKU20] finden. Viele dieser Experimente präferieren als Grundlage Beweisverfahren, die auf der Konnektionsmethode (KM) basieren, während noch immer die Mehrzahl der international verfügbaren Beweissysteme die Resolutionsmethode (RM) verwenden. Zum Verständnis dieser beiden differierenden Präferenzen muß man sich die wesentlichen Unterschiede dieser beiden Beweismethoden vor Augen halten.

Die RM ist ein exhaustives Verfahren, das bei der Suche nach einem Beweis für ein gegebenes Theorem im Prinzip in erschöpfender Weise alle denkbaren, für den Beweis potenziell nützlichen Lemmata in Form von Resolventen explizit generiert. Die Generierung von vielen Millionen solcher Lemmata bei der Suche nach dem Beweis eines einzigen Theorems sind dabei eher die Regel als die Ausnahme, was angesichts heutiger Rechengeschwindigkeiten von den meisten ATP-Spezialisten als hinnehmbar eingeschätzt wird. Der Vorteil, der sich mit diesem Vorgehen ergibt, liegt darin, daß im Erfolgsfall dann infolge des in der Flut von Lemmata schließlich gefundenen Einsatzes eines oder mehrerer möglichst guter Lemmata auch relativ kurze Beweise resultieren. Denn ein gutes Lemma kann im Beweis beliebig oft angewandt werden, ohne daß es jedesmal neu bewiesen werden muß, was genau dadurch zu kürzeren Beweisen führt.

Die Beweissuche nach der KM findet auf einem um Größenordnungen kompakteren Suchraum statt, der allein vom Umfang der zu beweisenden Formel und ihrer inneren Struktur bestimmt ist [BO20]. In ihrer ursprünglichen Form und ohne besondere Vorkehrungen weist diese Methode jedoch keinerlei zusätzliche Lemmagenerierung wie in der RM auf, was sich in manchen Fällen sehr nachteilig auf die Länge der resultierenden Beweise und damit natürlich auch auf den Aufwand bei der Beweissuche auswirkt, sodaß aus genau diesem Grund Resolutionsbeweiser bei entsprechend vorhandener Rechenkapazität und in entsprechenden Fällen von Theoremen Konnektionsbeweisern überlegen sind, obwohl ihre Suche aus den soeben genannten Gründen grundsätzlich wesentlich aufwändiger ist.

Die Identifikation von Lemmata ist aber auch in der KM ohne Weiteres leicht realisierbar.⁵ Wie zudem bereits in [BE93] mit dem dort dargestellten Konnektionsstrukturkalkül (KSK) gezeigt wurde, läßt sich der beschriebene Nachteil der KM in Bezug auf die Beweislängen

⁵ Im Gegensatz dazu ist es für die KM genauso wie für die RM grundsätzlich eine schwierige Aufgabe, unter den unzähligen denkbaren Lemmata die für die Beweissuche wirklich nützlichen aufzuspüren.

sofort beheben, wenn Lemmata in geeigneter Form Berücksichtigung finden. Dies ist in bestehenden Beweisen bislang nur ansatzweise realisiert worden. In [WB20] wird daher ein dem KSK vergleichbarer, jedoch pragmatischer Einsatz von Lemmata bei der Beweissuche beschrieben, wobei die Vorteile der KM nicht geschmälert und die Nachteile gegenüber der RM eliminiert werden.

Im Kontext der KM besteht ein Lemma aus einem Teil der zu beweisenden Formel samt einer Menge zugehöriger Konnektionen und Substitutionen, wobei zu den Details auf [WB20] verwiesen sei. Damit stehen wir auch hier vor der Aufgabe, eine möglichst gute Auswahl von Lemmata in die Beweissuche mit einzubeziehen, wobei die genannten Substitutionen als Träger von Qualitätsmerkmalen vermutet werden. Der Vorteil gegenüber der RM besteht hier nun darin, daß dieser Auswahlprozeß unabhängig von der Beweissuche – und nicht innerhalb der Beweissuche wie bei der RM – separat durchgeführt werden kann. Dies ermöglicht dann auch für diesen Auswahlprozeß den Einsatz von entsprechend konfigurierten Lernmechanismen auf der Basis von NNs. Da es sich bei diesem Auswahlprozeß um etwas spezifisch anderes als bei dem Beweissuchprozeß handelt, können die beiden Lernprozesse auch zielgenauer und mit insgesamt besseren Ergebnissen optimiert werden. Der experimentelle Nachweis dieser Einschätzung steht aber bislang noch aus.

Das hier beschriebene Vorgehen kommt dem menschlichen Beweisen jedenfalls viel näher als das der RM. Denn auch Mathematiker wählen Lemmata aufgrund ihrer Erfahrungen und einem Bauchgefühl aus und suchen dann unabhängig davon den Beweis zu erbringen, wobei dann auch die Beweissuche von ihren einschlägigen Erfahrungen im Beweisen unterstützt wird. Es ist genau dieser Aspekt des Einbringens von Erfahrungen und von Bauchgefühl, der mit NNs modelliert wird, wodurch die Iteration der Verfeinerungen einer Programmierung von Hand automatisiert und dem NN-Mechanismus übertragen wird. Die bisher damit erzielten experimentellen Erfolge zeigen, daß diese ersten Schritte einer synergetischen Integration von zwei bislang unabhängig betriebenen Teilgebieten der KI, nämlich ATP und ML, zu einer weiteren Leistungssteigerung der resultierenden Systeme führt. Wie diese Darstellung zeigt, schlummert hier noch ein erhebliches und bislang nur ansatzweise ausgeschöpftes Potenzial im Hinblick auf eine wesentlich verbesserte Performanz der ATP-Systeme.

4 Quo vadis, KI

Unsere Welt ist aus menschlicher Sicht in jeder Hinsicht extrem komplex. Ihr wissenschaftlich erzieltes Verständnis wird dem Menschen daher auch weiterhin nur teilweise möglich sein. Dies gilt für alle beobachtbaren Phänomene, seien es physikalische, biologische oder geistige. Die Letztgenannten mögen dabei das Bündel von Phänomenen repräsentieren, die wir im zweiten Abschnitt als IPsi-Phänomene apostrophiert haben und um die es in der KI in erster Linie geht. In Bezug auf ihr Verständnis stehen wir in einem gewissen Sinn noch immer erst am Anfang und im Hinblick auf weitere und tiefere Einblicke vor wahrhaft großen Herausforderungen.

Verständlicherweise sind Wissenschaftler wie alle Menschen stolz auf ihre Leistungen. Zudem ist die Erbringung geistiger Leistungen durch Maschinen auch nach Jahrzehnten von KI-Forschung noch immer ein Ereignis, das Aufsehen erregt und uns in besonderer Weise berührt bzw. manche unter uns auch beunruhigt. Es ist daher nicht verwunderlich, daß die mittels DL erbrachten technischen Leistungen, von denen im Abschnitt 2 die Rede war, ein derartiges Aufsehen und Interesse in der Öffentlichkeit erregen, wie wir es in den letzten Jahren erlebt haben. Täglich von Werbung berieselt und beispielsweise auf ein etwas verbessertes Waschmittel gleich mit „das neue Persil“ hingewiesen ist es daher nicht unverständlich, daß im Zusammenhang mit DL auch von der „neuen KI“ die Rede ist. Wie im Abschnitt 2 dargelegt, kann sachlich von einer neuen Wissenschaft KI im Zusammenhang mit DL aber definitiv keine Rede sein. DL hat diese Wissenschaft lediglich ein kleines Schrittchen weiter vorangebracht.⁶

Gleichwohl stellen sich im Zusammenhang mit NNs durchaus eine Reihe von interessanten Fragen, von denen wir einige hier diskutieren wollen. NNs modellieren ja die Arbeitsweise von Neuronen in Gehirnen. Wie bei jeder Modellierung stellt sich daher auch hier die grundsätzliche Frage, wie nahe diese Modellierung dem Original wirklich kommt? Die Ergebnisse der Hirnforschung legen tatsächlich den Schluß nahe, daß NNs nur eine relativ grobe Annäherung an die tatsächlichen Prozesse im Gehirn darstellen.

In der Euphorie über die Erfolge von DL haben sich KI-Forscher, wie dem Vernehmen nach beispielsweise Andrew Ng von der Stanford University, zu der Meinung verstiegen, NNs seien alles, was man zur Erreichung einer allgemeinen KI letztlich benötigen würde. Nun ist keiner von uns in der Lage, die Zukunft vorzusehen. Angesichts der vorherigen Frage und ihrer Antwort darauf, erscheint eine derartige Prognose aber ziemlich abwegig. Die heutige Wissenschaft KI umfaßt einen großen Strauß von unterschiedlichsten Blumen, sprich Teilgebieten oder Technologien, von denen DL nur eine unter vielen ist. Aufgrund meiner Erfahrung von mehr als einem halben Jahrhundert in KI kann ich nur wärmstens empfehlen, die Blüte all dieser Blumen zu pflegen und sich nicht nur auf die einer einzigen zu beschränken. In genau diesem Sinne sollte der Titel dieser Arbeit verstanden werden. Nur so werden wir nach meiner Überzeugung dem Verständnis und der Realisierung allgemeiner Intelligenz näherkommen.

Grundsätzlich ist es nicht völlig abwegig daraufhin zu spekulieren, daß NNs einmal so weiterentwickelt sein werden, daß sie dann die Prozesse im Gehirn quasi originalgetreu nachbilden. Dann wäre es grundsätzlich denkbar, daß alle geistigen Fähigkeiten, beispielsweise auch die von Mathematikern, allein durch Lernprozesse von NNs erreicht werden könnten. Beim gegenwärtigen Stand der KI ist ein derartiger zukünftiger Entwicklungsstand jedoch völlig unabsehbar. Umso mehr macht es daher beispielsweise Sinn, auf eine Kombination von logischem Schließen im Sinne von ATP und Lernverfahren auf der Grundlage von NNs zu setzen, wie wir es im letzten Abschnitt illustriert haben. Denn auch in der menschlichen Evolution haben die Mathematik und die Naturwissenschaften erst *nach* einer langen Ent-

⁶ In den Medien wird, beiläufig erwähnt, gelegentlich auch von einer „neuen KI“ in dem sprachlich salopp formulierten Sinne einer neuen, mit Methoden der KI entwickelten Software gesprochen.

wicklungszeit der Fähigkeit zum logischen Denken in den letzten Jahrtausenden überhaupt entstehen können. Um ein weiteres Beispiel einer derartigen Kombination anzuführen, wäre es denkbar, die menschliche Assoziation von sensorischen Eindrücken und den dafür von uns gebrauchten Begriffen mittels NNs nachzubilden. So könnten syntaktisch formulierte Aussagen mit einer Form von Semantik in Systemen ähnlich versehen werden, wie wir Menschen sie erleben. Experimente in dieser Richtung sind mir jedoch bislang nicht bekannt.

Aktuell sind, abgesehen von ethischen Gesichtspunkten, die in diesem Aufsatz außen vor gelassen werden, eine Reihe von weiteren erkennbaren Schwächen der bislang erreichten Technologie von NNs und DL tatsächlich sehr wohl bekannt und Gegenstand intensiver Forschungen. Dazu gehören beispielsweise das Fehlen von Erklärungen im Falle von DL-generierten Entscheidungen, die Fokussierung des Lernprozesse auf thematikfremde Merkmale, die Integration von Weltwissen in den Lernprozeß sowie das Lernen aus wenigen Beispielen, um nur vier wichtige derartige Themen beispielhaft anzuführen, die im Folgenden jeweils kurz erläutert werden.

Wenn ein menschlicher Schachspieler einen geschickten Schachzug macht, so kann er ihn in der Regel auch begründen, jedenfalls bis zu einem gewissen Grad. Ein mit DL trainiertes Schachprogramm ist dazu absolut nicht in der Lage. Bei der Entscheidung über Schachzüge mag dieser Unterschied nicht allzu gravierend sein. In anderen Anwendungen von DL, wie beispielsweise in der Medizin, erweist sich dieser Mangel an Transparenz von DL-trainierten Systemen als höchst problematisch. Sowohl ein Arzt wie auch sein Patient möchte in jedem Fall die Argumente erfahren, warum eine Behandlungsentscheidung so und nicht anders ausfällt. Erklärbare KI (explainable AI, xAI oder auch Explainable Interactive Learning, XIL) ist daher ein hochaktuelles Teilgebiet der KI von weltweitem Interesse (s. zB. [Gu18, HCM20] sowie [Sc20] und die dort genannten Referenzen). Erklärungen bestehen aus deklarativen Beschreibungen von Wissenszusammenhängen, bedürfen daher zur Integration in Systemen der Formalismen, die auf dem Gebiet der Wissensrepräsentation (knowledge representation and reasoning, KRR) entwickelt wurden. KRR läßt sich in gewisser Weise als verallgemeinertes ATP verstehen. KRR – und damit in gewissen Sinne auch ATP – ist in diesem Sinne für DL daher genauso von Bedeutung wie umgekehrt DL für ATP, wovon im Abschnitt 3 die Rede war. Tatsächlich läßt sich KRR als ein ML, DL ebenso wie ATP umfassendes Teilgebiet der KI verstehen. In [Bi18] wird zudem darauf hingewiesen, daß die KI-Technik einer Spezifikationsextraktion aus einem gegebenen Programm im Hinblick auf Erklärungen eine Rolle spielen könnte, was hier nur am Rande zusätzlich erwähnt sei.

In einem Interview mit der Frankfurter Allgemeinen Zeitung (FAZ) illustrierte einer der führenden DL-Forscher, Sepp Hochreiter, jüngst den Mangel einer Integration von Weltwissen in DL-Systemen mit dem Beispiel einer Plastiktüte, die vom Wind in die Bahn eines autonom gesteuerten Autos flattert. Ein menschlicher Fahrer weiß, daß von einer solchen Tüte keine Gefahr ausgehen kann und setzt daher seine Fahrt unbeeindruckt fort. Ein DL-trainiertes Steuerungssystem kann dagegen den entscheidenden Unterschied einer derartigen Plastiktüte und – sagen wir – eines herabfallenden Dachziegels nicht erkennen

und bremst daher die Fahrt in beiden Fällen ab. Das Generierungssystem GPT-3 (generative pretrained transformer) von OpenAI [Gr20], um noch ein zweites Beispiel anzuführen, generiert zwar erstaunlich perfekt empfundene Texte in Englisch oder anderen symbolischen Kommunikationssprachen quasi durch Kombination von Textschnipseldaten. Der resultierende Text entsteht durch Optimierung von sage und schreibe 175 Milliarden Parametern auf der Grundlage von 570 Gigabyte an Trainingstext (entspricht etwa einer Billion Wörter) mittels des zugrundeliegenden NNs. Da es aber eben reine Schnipselkonfiguration leistet und nichts, aber auch gar nichts in irgendeiner Weise „versteh“, führt dies dann gelegentlich zu lächerlichen Inhalten. Auch diese beiden Beispiele demonstrieren, daß beim gegenwärtigen Stand der Kunst DL ohne KRR wohl nicht umfassend erfolgreich sein kann, weil bislang nur KRR Weltwissen zu repräsentieren imstande ist.

Menschen lernen auch aus einem oder wenigen Beispielen. DL dagegen ist immer auf riesige Datenmengen angewiesen, um zu einem einigermaßen erfolgreichen Verhalten zu gelangen, und es ist beim gegenwärtigen Stand der Kunst nicht zu erkennen, wie DL allein die umfassendere menschliche Lernfähigkeit insoweit erreichen könnte. Vielmehr spricht Vieles dafür, daß auch hier nur eine Synergie zwischen KRR und ML zu einem entsprechenden Erfolg führen wird.

Wie diese drei ausgewählten Beispiele von durchaus auch bei DL erkennbaren Schwächen illustrieren, steckt auch hinter DL trotz seiner großartigen Erfolge doch nur eine menschgemachte Technologie mit entsprechenden Grenzen ihrer Leistungsfähigkeit. Bei allem Verständnis für die menschlich verständliche Begeisterung über diese Erfolge stimme ich mit Steven H. Walker, einem früheren DARPA Direktor, in folgender Einschätzung daher voll überein: „*DARPA believes current research and development investments around the world are much too focused on second-wave AI or machine learning*“ [FCL20, p.4]. Dabei sollte man in diesem Zitat auch auf seine Erwähnung der zweiten vom ML geprägten Welle der Fokussierung in der KI achten, deren Anfänge in den USA bereits in die 1970er Jahre zurückreichen, sodaß auch dieser Teil der KI so neu gar nicht ist. Nur in einer Synergie verschiedenster Stränge der KI-Forschung und anderer Forschungsgebiete werden sich erfolgreiche Entwicklungen zum Wohle aller ergeben. In diesem Sinne wollen wir uns daher im Rest dieses Abschnitts wieder ausschließlich auf die KI als Ganzes konzentrieren. Angesichts des unüberschaubaren Umfangs der KI wäre dabei jegliches Eingehen auf irgendwelche technischen Details im Kontext dieser Arbeit völlig willkürlich und damit definitiv unangebracht.

Vielmehr stellt sich mir die grundsätzliche Frage, wie wir in Europa und Deutschland die KI als Wissenschaft und Technologie, auch im internationalen Wettbewerb, besser voranbringen könnten als dies in den letzten 75 Jahren gelungen ist. Die historische Erfahrung lehrt uns dabei, daß für eine gedeihliche Entwicklung eine realistische Vision unabdingbar ist. Denn es waren genau solche Visionen, beispielsweise von Vannevar Bush im Jahr 1945 [Bu45], John McCarthy 1956 [Mc56] und Josef Licklider 1960 [Li60], die in den USA die Leitlinien für die Entwicklung der KI dort vorgegeben und zum großen Erfolg geführt haben. Dazu gehörte natürlich vor allem auch, daß diese Visionen von den maßgeblichen

Entscheidern auch wahrgenommen und beachtet wurden. In den USA ging man 1962 sogar soweit, den Visionär Licklider das US Information Processing Techniques Office (IPTO) in der Advanced Research Projects Agency (ARPA) gründen zu lassen. Die vergleichbaren deutschen Visionäre Zuse und Steinbuch, von denen im Abschnitt 2 die Rede war, hatten hierzulande dagegen keinerlei Chance zu einer vergleichbaren Realisierung ihrer Visionen erhalten, obwohl sie ihren amerikanischen Kollegen an Durchblick in nichts nachstanden (s. zB. [St61]).

Dabei haben die Visionen aus diesen Anfängen der KI bis zu einem gewissen Grad auch heute noch unverändert Gültigkeit. So schrieb Bush: „*Professionally our methods of transmitting and reviewing the results of research are generations old and by now are totally inadequate for their purpose.*“ Diese damals für die Wissenschaft formulierte Einschätzung hat heute vor allem Gültigkeit für die Methoden, die unsere gesellschaftlichen Entscheidungsprozesse in vielen Bereichen wie beispielsweise in Politik, Verwaltung, Recht, Wirtschaft usw. prägen, die aus KI-Sicht recht antiquiert erscheinen und deren Neukonzeptionen auf der Grundlage wissenschaftlicher Erkenntnisse längst überfällig sind (vgl. dazu beispielsweise die diesbezüglichen Ausführungen in dem Buch [Bi03] sowie speziell zum Recht in [Bi05]). Denn Menschen sind naturgemäß nur sehr eingeschränkt fähig, globalere Gesichtspunkte ihren Entscheidungen zugrunde zu legen, sondern sie denken, wie alle Lebewesen, in Bezug auf ihre Handlungsentscheidungen in allererster Linie zeitlich und räumlich lokal und vorwiegend an ihr eigenes Wohlergehen und das ihrer Sippe (man denke beispielsweise nur an das aktuell so oft gehörte „America first“). Auch demokratisch herbeigeführte Entscheidungen sind aus dem gleichen Grund von erratischen Einflüssen geprägt und daher ähnlich bedingt tauglich wie diejenigen von einzelnen Personen. Nur mittels KI könnte man eine objektivere Entscheidungsbasis aufbauen und darauf beruhende Mechanismen entwickeln, die die unterschiedlichen Interessen global, fair und auch zukunftsorientiert berücksichtigen.

Es wäre daher sehr wünschenswert, daß sich die Entwicklung und Förderung der KI an einer Vision dieser Art orientieren würde. Die plan- und visionslose Ausschüttung von Milliarden an Fördergeldern nach dem Gießkannenprinzip oder ähnlich oberflächlichen Prinzipien wird Europa und Deutschland dagegen nicht sehr weit voranbringen, weder in der KI noch als Gesellschaft. Leider ist im Rahmen erstarrter organisatorischer und institutioneller Strukturen kaum zu erhoffen, daß sich an dem bisher geübten Weiterwursteln und reflexartigen, kurzfristigen Reagieren auf Anstöße von außen Grundlegendes ändern wird. Weil man die Hoffnung aber nie aufgeben sollte, seien dazu dennoch einige Hinweise gegeben.

In meiner Jugend wurde oft das Sprüchlein zitiert: „Wenn das Wörtchen *wenn* nicht wär, wär mein Vater ein Millionär.“ Es macht danach wenig Sinn, der Vergangenheit nachzutruern und vorwurfsvoll in einer Rückschau darüber zu spekulieren, wie die Entwicklung der Informatik und KI wohl gelaufen wäre, *wenn* Zuse nach 1945 und Steinbuch nach 1960 in Positionen berufen worden wären, in denen sie entscheidenden Einfluß auf die Weichenstellungen in der Wissenschafts- und Technologieentwicklung hätten nehmen können.

Im Gegensatz dazu macht es aber eine Menge Sinn, die damaligen organisatorischen und institutionellen Strukturen daraufhin zu untersuchen, warum sie die adäquate Positionierung von weitsichtigen Größen wie Zuse und Steinbuch nicht zwangsläufig befördert hatten. Mögen diese beiden Persönlichkeiten auch besonders ins Auge springen, könnte hier eine erstaunlich lange Liste ähnlicher Fälle erstellt werden. Beispielsweise könnte man auch Andreas von Bechtolsheim erwähnen, der Deutschland frustriert verließ und dann in den USA als Entwickler und Unternehmer höchst erfolgreich reüssierte, oder Ernst Dickmanns, dessen autonome Fahrzeuge schon Mitte der 1980er Jahre der internationalen Konkurrenz weit voraus waren, dessen Technologie von den deutschen Autobauern aber nicht weitergeführt wurde, oder Sebastian Thrun, der leider auch in die USA abgewandert ist und dort schließlich die auf dem autonomen Fahren international führende Firma Waymo mitbegründet hat, oder die vielen deutschen Spitzenkräfte in ATP, die sich nach 2000 mangels verfügbarer Positionen in alle Himmelsrichtungen international zerstreuen mußten, oder der einstige europäische Vorsprung im maschinellen Verstehen und in der Verarbeitung natürlicher Sprache, dessen Vermarktung dann doch in den USA erfolgte, und viele bzw. vieles andere mehr. Die große Anzahl solcher Fälle muß ins Auge stechen und suggeriert, daß hier organisatorische Mängel in den institutionellen Strukturen ebenso wie mentale Denkmuster eine entscheidende Rolle spielen dürften. Eine wissenschaftliche Ergründung dieser Rolle und Konsequenzen aus den sich daraus ergebenden Erkenntnissen wären daher im Hinblick auf eine Revision dieser Strukturen und Denkmuster überfällig.

In der Tat bin ich davon überzeugt, daß alle einschlägigen Institutionen durchgreifender Reformen bedürften: Angefangen von dem föderalen Hochschulwesen, in dem sich wünschenswerte Spitzenuniversitäten wie Stanford oder MIT hierzulande prinzipiell nicht entfalten können, über eine von Gremien dominierte DFG, die zB. bei größeren Entscheidungen mehr auf Gruppenkonsens als auf individuelle und in Eigenverantwortung schriftlich begründete Beurteilungen setzt, bis hin zu den unzähligen Ministerien auf Bundes- und Landesebene, die sich im Wettbewerb um die Förderung von prestigeträchtigen Projekten gegenseitig eifersüchtig beäugen und zu übertreffen suchen. Für das *normale* Gedeihen von Forschung und Entwicklung scheint dieses System durchaus gut zu funktionieren. Zur Hervorbringung von wirklicher Spitzenforschung und echten Pionierleistungen samt deren zügiger Umsetzung in wirtschaftlichen Erfolg ist es aber nur sehr bedingt in der Lage, wie die letzten Jahrzehnte jedermann erkennbar gezeigt haben. Und im weltweiten Wettbewerb scheint nur der zu reüssieren, der genau darin die Nase vorne hat.

Zudem scheint mir in diesem System eine weitsichtig orientierte, steuernde Institution wie das DARPA zu fehlen. Wenn man einmal davon absieht, daß DARPA immer eine Institution des amerikanischen Verteidigungsministeriums gewesen ist, dann besticht seine jahrzehntelange visionsgeprägte und personell hervorragend vertretene Rolle allemal, in der es ganz gezielt Exzellenz in großzügiger Weise förderte und zwar unabhängig von den kurzfristig erreichbaren Zielsetzungen [FCL20]. In geschickter Weise brachte es Wissenschaftler in Grundlagenforschung mit Anwendern zusammen, wodurch der Wissenstransfer ungehindert und ohne Zwischenbarrieren erfolgen konnte. Nirgendwo in

Europa oder Deutschland ist eine vergleichbar erfolgreiche Institution wie das DARPA auszumachen.

Auf einer noch grundlegenden Ebene sehe ich längerfristig die Notwendigkeit einer Neuordnung des gesamten Wissenschaftssystems. Der Abschnitt 2 hat im Zusammenhang mit der dort beschriebenen IPSI-Wissenschaft schon einige Hinweise hierzu gegeben, nicht zuletzt den Hinweis auf die einschlägige Arbeit [Bi18]. Wie der Prozeß einer solchen Neuordnung planvoll in Gang gesetzt werden könnte, dazu fehlen mir angesichts der festgezurrten Strukturen allerdings die Ideen.

Auch glaube ich zu erkennen, was aber wissenschaftlich genauer untersucht und präziser formuliert werden müßte, daß wir hierzulande in einer Gesellschaft leben, die den Durchschnittsmenschen generell zum Maßstab von Bewertungen präferiert. Geistesgenies genießen in dieser Denke keinen besonderen Status als Vorbilder oder besonders zu fördernde Zeitgenossen, sondern werden bestensfalls wegen ihrer Eigenheiten karikiert. Nur Genies, deren geniale Fähigkeiten man mit den Augen oder Ohren bestaunen kann, wie beispielsweise Fußballer oder SängerInnen, werden bewundert und dafür mit Geld überschüttet, auch wenn ihr Tun auf lange Sicht für die Gesellschaft bei weitem nicht so nutzbringend wie das von erfolgreichen Wissenschaftlern sein mag.

5 Konklusion

Die Wissenschaft der Künstlichen Intelligenz (KI), hier in einem umfassenden Sinne als IPSI-Wissenschaft apostrophiert, und die aus ihr hervorgehende Technologie hat in den letzten Jahren aufgrund aufsehenerregender Erfolge international eine große Beachtung und Förderung erfahren dürfen. Da Europa und Deutschland hierbei bislang nur relativ bescheidene Rollen spielen konnten, werden in dem vorliegenden Beitrag einige grundlegende Hinweise daraufhin zusammengestellt, wie diese Situation verbessert werden und Europa zurück in eine Führungsrolle auf dem Gebiet der KI gebracht werden könnte. Die im Abschnitt 4 zusammengestellten Hinweise resultieren dabei teilweise aus einer Sicht auf ausgewählte, im Abschnitt 2 dargestellte Aspekte der Geschichte der KI sowie aus dem im Abschnitt 3 behandelten Beispiel einer Synergie der Gebiete des automatischen Beweisens und des maschinellen Lernens. Aus allem ergibt sich die im Titel zum Ausdruck gebrachte Empfehlung, daß man allen in der KI betriebenen Teilgebieten genügend Raum lassen und sich nicht auf eines dieser beschränken sollte, was besondere Gewichtungen natürlich keineswegs ausschließen soll.

Dank. Ich danke Ralf Bülow für seine Hinweise auf die frühen Zuseschen Arbeiten, Christian Vater für hilfreiche Hinweise zu Steinbuch, Hannes Bibel für seine technische Unterstützung sowie Reinhard Kahle und Klaus Mainzer für die Einladung zu diesem Workshop.

Literaturverzeichnis

- [AD20] Alspector, J., Dietterich, T.G.: DARPA's role in machine learning. *AI Magazine* 41(2), 36–48 (2020)
- [An64] Anderson, A.R. (ed.): *Minds and Machines. Contemporary Perspectives in Philosophy*, Prentice Hall, Englewood Cliffs NJ (1964)
- [Bi05] Bibel, L.W.: AI and the conquest of complexity in law. *Artificial Intelligence and Law Journal* 12, 159–180 (2005)
- [BE93] Bibel, W., Eder, E.: Methods and calculi for deduction. In: Gabbay, D.M., Hogger, C.J., Robinson, J.A. (eds.) *Handbook of Logic in Artificial Intelligence and Logic Programming*, vol. 1, chap. 3, pp. 71–193. Oxford University Press, Oxford (1993)
- [Bi03] Bibel, W.: *Lehren vom Leben – Essays über Mensch und Gesellschaft*. Sozialwissenschaft, Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden (2003)
- [Bi14] Bibel, W.: Artificial Intelligence in a historical perspective. *AI Communications* 27(1), 87–102 (2014)
- [Bi18] Bibel, W.: On a scientific discipline (once) named AI. In: *Proceedings of the Twenty-Seventh International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI 2018)*. pp. 5143–5149. IJCAI (2018), <https://www.ijcai.org/proceedings/2018/0713.pdf>
- [Bi20a] Bibel, W.: On the development of AI in Germany. *Künstliche Intelligenz* 34(2), 251–258 (2020), open Access <https://rldcu.be/b3oxS>
- [Bi20b] Bibel, W.: Der unterschätzte Konrad Zuse. *Frankfurter Allgemeine Zeitung* (226), 18 (28 September 2020), <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/digitec/der-unterschaetzte-konrad-zuse-16974194.html>
- [BO19] Bibel, W., Otten, J.: Experiments with connection method provers. In: *4th Conference on Artificial Intelligence and Theorem Proving, AITP 2019, April 7-12, 2019, Obergurgl, Austria* (2019), <http://aitp-conference.org/2019/slides/WB.pdf>
- [BO20] Bibel, W., Otten, J.: From Schütte's formal systems to modern automated deduction. In: Kahle, R., Rathjen, M. (eds.) *The Legacy of Kurt Schütte*, chap. 13, pp. 215–249. Springer, Cham (2020)
- [Bü20] Bülow, R.: Konrad Zuse und der Plankalkül. *Heinz Nixdorf Museums Forum, HNF Blog Neues von gestern aus der Computergeschichte* (22 Juni 2020), <https://blog.hnf.de/konrad-zuse-und-der-plankalkuel/>
- [Bu45] Bush, V.: As we may think. *Atlantic Monthly* 176(7), 101–108 (1945)
- [Da57] Davis, M.: A computer program for Presburger's algorithm. In: *Summaries of talks presented at the Summer Institute for Symbolic Logic*. pp. 215–233. Institute for Defense Analysis, Princeton NJ (1957), also contained in [SW83, 41–48].
- [DS04] Dorigo, M., Stützle, T.: *Ant Colony Optimization*. MIT Press, Boston MA (2004)
- [ESS89] Ertel, W., Schumann, J.M., Suttner, C.B.: Learning heuristics for a theorem prover using back propagation. In: Retti, J., Leidlmair, K. (eds.) *5. Österreichische Artificial-Intelligence-Tagung: Igl/Tirol*, 28.-31. März. pp. 87–95. Springer, London (1989)

- [FKU20] Färber, M., Kaliszzyk, C., Urban, J.: Machine learning guidance for connection tableaux. *Journal of Automated Reasoning* (2020), <https://doi.org/10.1007/s10817-020-09576-7>
- [FF63] Feigenbaum, E.A., Feldman, J. (eds.): *Computers and Thought*. McGraw-Hill, New York NY (1963)
- [FCL20] Fouse, S., Cross, S., Lapin, Z.J.: DARPA's impact on Artificial Intelligence. *AI Magazine* 41(2), 3–8 (2020)
- [Gr20] Graf, A.: Multitalent für Sprache. *Spektrum.de* (11 August 2020), <https://www.spektrum.de/news/kuenstliche-intelligenz-der-textgenerator-gpt-3-als-sprachtalent/1756796> (Zugriff 17.8.20)
- [Gu18] Guidotti, R., et al.: A survey of methods for explaining black box models. *ACM Computer Surveys* 51, 1–42 (2018)
- [HCM20] Holzinger, A., Carrington, A., Müller, H.: Measuring the quality of explanations: The system cusability scale. *KI - Künstliche Intelligenz* 34(2), 193–198 (2020)
- [HFB20] Hunt, E.R., Franks, N.R., Baddeley, R.J.: The bayesian superorganism: externalized memories facilitate distributed sampling. *Journal of the Royal Society Interface* 17 (2020), 20190848
- [KIT06] KIT-Archiv: 27048 Nachlass Karl Steinbuch. *Findbuch* (2006/2007), <http://xputer.de/steinbuch/Steinbuchs-Nachlass.htm> (Zugriff 13.8.2020)
- [KSH12] Krizhevsky, A., Sutskever, I., Hinton, G.E.: Imagenet classification with deep convolutional neural networks. In: *Proceedings of the 25th International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2012)*. vol. 1, pp. 1097–1105. Association of Computing Machinery (ACM), New York NY (2012)
- [Le98] Lecun, Y., Bottou, L., Bengio, Y., Haffner, P.: Gradient-based learning applied to document recognition. In: *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineering (IEEE)*. vol. 86, pp. 2278–2324. IEEE (1998), doi.org/10.1109/5.726791
- [Li60] Licklider, J.C.R.: Man-computer symbiosis. *IRE Transactions on Human Factors in Electronics HFE-1*(1), 4–11 (1960)
- [Mc56] McCarthy, J.: *Artificial intelligence (1956), a project proposal*
- [Mc55] McCarthy, J., Minsky, M.L., Rochester, N., Shannon, C.E.: *A proposal for the Dartmouth summer research project on artificial intelligence (August 31 1955)*
- [NSS56] Newell, A., Shaw, J., Simon, H.: The logic theory machine. In: *IRE Trans. Information Theory*. vol. IT-2, pp. 61–79 (1956), also contained in [SW83, 49–73].
- [Ni09] Nilsson, N.J.: *The Quest for Artificial Intelligence: A History of Ideas and Achievements*. Cambridge University Press (2009)
- [PU20] Piotrowski, B., Urban, J.: Guiding inferences in connection tableau by recurrent neural networks. In: Benz Müller, C., Miller, B. (eds.) *CICM 2020: Intelligent Computer Mathematics, Proceedings of the International Conference on Intelligent Computer Mathematics*. LNCS, vol. 12236, pp. 309–314. Springer (2020), https://doi.org/10.1007/978-3-030-53518-6_23

- [Ro58] Rosenblatt, F.: The perceptron. a probabilistic model for information storage and organization in the brain. *Psychological Reviews* 65, 386–408 (1958)
- [Sc20] Schramowski, P., Stammer, W., et al.: Making deep neural networks right for the right scientific reasons by interacting with their explanations. *Nature Machine Intelligence* 2, 476–486 (August 2020)
- [Sh50] Shannon, C.E.: Programming a digital computer for playing chess. *Philosophy Magazine* 41, 356–375 (1950)
- [SW83] Siekmann, J., Wrightson, G. (eds.): *Automation of Reasoning – Classical Papers on Computational Logic 1957–1966*, vol. 1. Springer, Berlin (1983)
- [St61] Steinbuch, K.: *Automat und Mensch – Über menschliche und maschinelle Intelligenz*. Springer (1961)
- [St60] Steinbuch, K.: Elektrischer Zuordner mit Lerncharakter. Deutsches Patent 179409 (Anmeldetag 23 Sept 1960)
- [Tu50] Turing, A.M.: Computing machinery and intelligence. *Mind* 59, 433–460 (1950), also in [FF63, 11–35] and [An64, 4–30].
- [WB20] Wernhard, C., Bibel, W.: Comparative studies of complex proofs, (2020 in preparation)
- [Wi48] Wiener, N.: *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. MIT Press, Cambridge MA (1948)
- [Zu48] Zuse, K.: Über den Plankalkül als Mittel zur Formulierung schematisch kombinativer Aufgaben. *Archiv der Mathematik* 1(6), 441–449 (1948)
- [Zu49] Zuse, K.: Die mathematischen Voraussetzungen für die Entwicklung logistisch-kombinativer Rechenmaschinen. *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik* 29(1/2), 36–37 (1949)
- [Zu50b] Zuse, K.: Kombinierte numerische und nichtnumerische Rechenmaschine. Patentschrift Nr.926449, Deutsches Patentamt (13 Mai 1950), 11 Seiten
- [Zu50a] Zuse, K.: Schlüssel-Programmwerk. Patentschrift Nr.977282, Deutsches Patentamt (25 April 1950), 9 Seiten